



Etude des scénarios de déploiement mondial de l'électronucléaire

E. Merle-Lucotte, D. Heuer, C. Le Brun, J.M. Loiseaux

► To cite this version:

E. Merle-Lucotte, D. Heuer, C. Le Brun, J.M. Loiseaux. Etude des scénarios de déploiement mondial de l'électronucléaire. 2004, pp.1-31. in2p3-00023188

HAL Id: in2p3-00023188

<https://hal.in2p3.fr/in2p3-00023188>

Submitted on 23 Nov 2004

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Etude des scénarios de déploiement mondial de l'électronucléaire

E. Merle-Lucotte, D. Heuer, C. Le Brun, J.M. Loiseaux

Novembre 2004

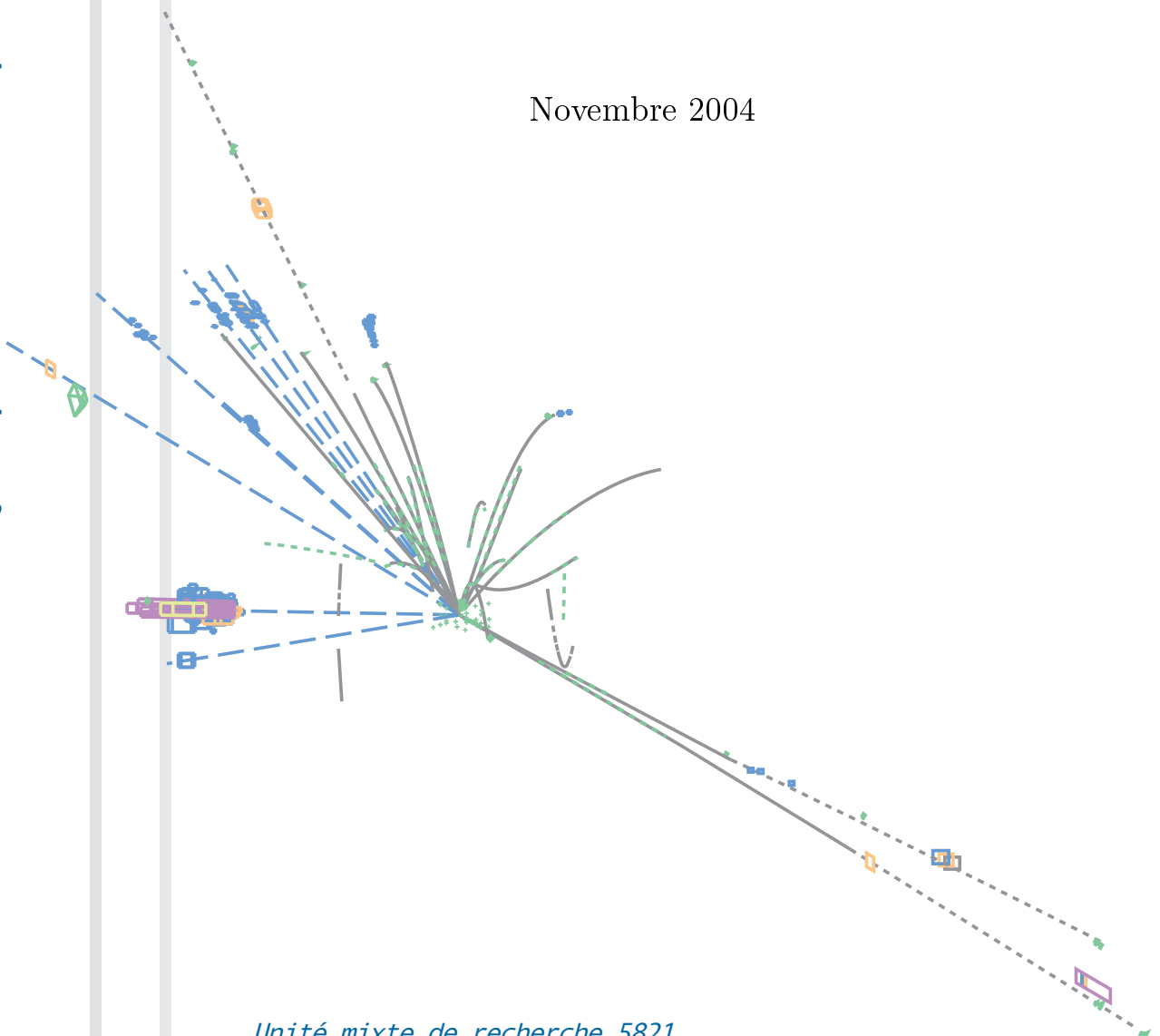


Table des matières

1	Introduction	2
2	Données de base : scénario énergétique et ressources disponibles	3
2.1	Objectifs énergétiques choisis	3
2.2	Les ressources naturelles en uranium et en thorium	5
2.3	Utilisation des données de base dans les calculs paramétrés	6
3	Parc de réacteurs à eau ordinaire	7
3.1	Réacteurs utilisés	7
3.2	Caractéristiques des réacteurs existants	7
3.3	Caractéristiques des futurs réacteurs	9
3.4	Scénarios de déploiement étudiés	9
3.4.1	Situation actuelle	9
3.4.2	Utilisation optimisée des réserves en uranium	11
4	Parc composé de réacteurs à eau ordinaire et de réacteurs à neutrons rapides (RNR)	13
4.1	Caractéristiques des RNR utilisés	13
4.2	Caractéristiques des réacteurs à eau ordinaire utilisés	14
4.3	Scénario basé sur des RNR avec caloporteur métal liquide	14
4.4	Scénario basé sur des RNR avec caloporteur gaz	16
4.5	Scénario basé sur des RNR à caloporteur métal liquide, démarrés au Plutonium ou à l' ^{235}U	18
5	Parc composé de réacteurs à eau ordinaire et de réacteurs à sels fondus (RSF)	19
5.1	Réacteurs à sels fondus utilisés : le “Thorium Molten Salt Reactor”	20
5.2	Réacteurs à eau ordinaire utilisés	21
5.3	Résultat du déploiement du parc composé de réacteurs à eau ordinaire et de réacteurs à sels fondus	22
6	Parc composé de réacteurs à eau ordinaire, de RNR et de RSF	23
6.1	Réacteurs à eau ordinaire utilisés	23
6.2	Réacteurs à neutrons rapides utilisés	24
6.3	Réacteurs à sels fondus utilisés : TMSR	24
6.4	Résultat du déploiement du parc avec des réacteurs à eau légère, des RNR à caloporteur métal liquide, et des TMSR	25
7	Conclusions et perspectives	27

1 Introduction

Maîtriser la demande énergétique mondiale qui a tendance à exploser est un impératif. Cependant, même avec une politique très volontariste, on voit mal comment la demande énergétique ne doublerait pas d'ici à 2050. Satisfaire cette demande nous semble nécessaire. Il est également évident que les rejets de gaz à effet de serre doivent être réduits pour en limiter les conséquences dramatiques. Une pénurie d'énergie pourrait donc s'installer si de nouvelles sources de production massive d'énergie ne se mettent pas en place. Le nucléaire peut largement contribuer à cette production massive d'ici à 2050 à condition que l'on réussisse un déploiement coordonné et optimisé [1]. Cela impose alors une réflexion dès à présent sur la situation actuelle du nucléaire et sur son extrapolation vers le futur, donc sur les moyens à mettre en oeuvre et les transitions possibles.

Plusieurs problèmes cruciaux se posent alors et motivent la présente étude : les réserves en ^{235}U , seul noyau fissile naturel, sont limitées, ce qui peut mener assez rapidement à un épuisement de ces ressources si l'on continue dans la voie actuelle de production d'énergie nucléaire. Par ailleurs, le démarrage de nouvelles filières de réacteurs, basées sur les deux autres éléments fissiles accessibles que sont le plutonium et l' ^{233}U , nécessite de prévoir et d'organiser suffisamment tôt la production de ces éléments non disponibles à l'état naturel.

Un déploiement de l'électro-nucléaire réussi et coordonné doit ainsi prendre en compte un nombre important de facteurs, dont :

- l'évolution attendue de la demande énergétique mondiale et plus précisément la contribution qui proviendra du nucléaire ;
- la disponibilité des ressources naturelles (uranium, thorium) et les stocks constitués (uranium appauvri, plutonium, ^{233}U ...) ;
- les différents types de filières (réacteurs, combustibles) envisagées dans les années à venir et leurs caractéristiques, notamment les radio-toxicités induites par les déchets produits.

Le but de notre étude est d'examiner les possibilités de déploiement de l'électro-nucléaire au niveau mondial et ses limitations. Pour cela, nous nous attacherons en particulier à vérifier la disponibilité des réserves d'uranium 235, seul élément fissile naturel et par conséquent contrainte majeure dans le cadre d'un développement durable. En second lieu, nous nous intéresserons aux possibilités d'arrêt à terme des divers parcs de réacteurs démarrés, en considérant uniquement les noyaux lourds dont la gestion est délicate. La production des produits de fission ne sera pas prise

en compte dans notre discussion sur les scénarios puisqu'elle est pratiquement la même pour toutes les filières de réacteurs.

L'imbrication complexe des facteurs et contraintes présentés ci-dessus rend nécessaire l'utilisation de l'outil informatique, que nous avons développé sous forme de calculs paramétrés [2] afin de répondre de façon cohérente à une production énergétique durable et intense.

La première section présente les données, en terme de besoins énergétiques et de ressources disponibles, sur lesquelles est basée toute notre étude, ainsi que la prise en compte de ces données dans les calculs paramétrés utilisés pour étudier le déploiement électro-nucléaire. Les scénarios étudiés sont présentés dans les sections suivantes, ainsi que les résultats obtenus à ce jour en terme de développement du parc de réacteurs, et des stocks de ressources disponibles.

Dans ce papier va apparaître la nécessité de produire de la matière fissile en grandes quantités. Cette production et la surgénération dépendent beaucoup de la technologie même des réacteurs. Aussi avons-nous utilisé des données estimées, en attendant que des études en cours au CNRS fournissent des données plus étayées. Ces données estimées permettent déjà de visualiser comment les contraintes peuvent jouer sur un déploiement important du nucléaire.

2 Données de base : scénario énergétique et ressources disponibles

2.1 Objectifs énergétiques choisis

La projection d'évolution des besoins énergétiques dans nos scénarios a pris comme point de départ celle de la référence[3]. Cette projection (voir le tableau 1) présente un scénario énergétique basé sur une population mondiale de 8 à 10 milliards de personnes en 2050, dont les caractéristiques sont de tenir compte des restrictions potentielles sur les énergies fossiles, en particulier sur le pétrole et le gaz, et de présenter une forte croissance du nucléaire.

Plus précisément, nous avons évalué nos projections grâce à un calcul assez simple et à quelques hypothèses, notamment une stabilisation des fossiles. Pour quantifier l'évolution de la demande énergétique mondiale, ré-écrivons la comme :

$$E = \frac{E}{\text{PIB}} * \frac{\text{PIB}}{N} * N$$

- avec
- N : population mondiale
 - PIB/N : PIB par habitant
 - E/PIB : intensité énergétique

	2000	2020	2050
Population	6 milliards	7,5 milliards	8-10 milliards
Energie primaire totale	9,3 Gtep	14 Gtep	18 Gtep
Part des Energies fossiles (pétrole + gaz + charbon)	8 Gtep (85%)	12,2 Gtep (87%)	12,6 Gtep (70%)
Part Renouvelables + Hydraulique	0,7 Gtep (7,5%)	0,9 Gtep (6,5%)	1,4 Gtep (8%)
Part du Nucléaire	0,6 Gtep (6,5%)	0,9 Gtep (6,5%)	4 Gtep (22%)

TAB. 1 – *Projections énergétiques à l'horizon 2050 d'après R.P. Bauquis (Gtep : milliard de tonnes équivalent-pétrole).*

En un demi-siècle, d'après des estimations démographiques, la population mondiale devrait passer de 6 milliards en 2000 à environ 9 milliards d'habitants en 2050 (facteur 3/2). La croissance annuelle (augmentation du PIB/habitant) est estimée selon divers scénarios de 1,5 % pour un scénario pessimiste à 3 % pour un scénario plus optimiste. Le terme $\frac{\text{PIB}}{N}$ est donc multiplié par un facteur 2,1 à 4,4. L'intensité énergétique, qui prend en compte en particulier les économies d'énergie, pourrait induire un facteur 0,5 dans la formule précédente. Au total, on voit alors la demande énergétique mondiale augmenter d'un facteur 1,6 à 3,3. Pour la suite, nous prendrons une valeur intermédiaire basse : une augmentation d'un facteur 2.

Nous pouvons alors estimer la part du nucléaire dans la future production énergétique mondiale. Certaines nouvelles hypothèses sont nécessaires :

- Une stabilisation de l'utilisation des énergies fossiles au niveau actuel.
- Une équi-répartition finale entre les énergies renouvelables et le nucléaire.

La répartition des apports des différentes sources commerciales d'énergie ainsi obtenues est résumée dans le tableau 2.

Energie primaire en Gtep	2000	2050
Fossiles	8	8
Hydraulique + Nouveaux Renouvelables	0,7	5,3
Nucléaire	0,6	5,3
Total	9,3	18,6

TAB. 2 – *Contribution des différentes sources commerciales d'énergie primaire en 2000 et en 2050.*

De ces chiffres, il est aisé de voir que le nucléaire voit sa part croître environ d'un facteur 8 d'ici à 2050, scénario énergétique que nous avons considéré dans toute la

suite de notre étude. Il est à noter qu'un tel scénario, très optimiste notamment en terme d'économies d'énergie et de la part des nouvelles énergies renouvelables, ne permet pas de contenir l'augmentation des gaz à effet de serre, puisque l'on a simplement stabilisé les fossiles. Il s'agit donc probablement d'un scénario minimal pour l'énergie nucléaire. D'autres études[4][5] ont abouti à des projections équivalentes.

En se concentrant sur l'évolution de l'énergie électrique nucléaire, tous les scénarios de déploiement de parcs de réacteurs étudiés ci-dessous sont ainsi basés sur l'objectif de production suivant (voir tableau 3) : celle-ci débute en 1970, atteint une production de 1800 TWatt-heure-électrique (TWhe) en 1985 et 2400 TWhe en 2000. La production énergétique par le nucléaire est presque stable jusqu'en 2015, croît régulièrement de 6,2% par an jusqu'en 2050 pour obtenir un facteur 8, puis croît d'un peu plus de 1,1% par an jusqu'en 2100. Cette extrapolation des prévisions à l'horizon 2100 nous permet de tester la pérennité des scénarios de déploiement.

1970	2000	2015	2050	2100
0 TWhe	2400 TWhe	2800 TWhe	18000 TWhe	32400 TWhe
0 GWe.an	340 GWe.an	400 GWe.an	2570 GWe.an	4630 GWe.an

TAB. 3 – *Prévisions de production d'électricité par le nucléaire à l'horizon 2100 en extrapolant les références [3][4][5], exprimées en TeraWatt-heure électrique (TWhe), et en GigaWatt électrique-an (GWe.an) en considérant un taux de fonctionnement des réacteurs de 80%.*

Dans les sections suivantes, nous allons étudier successivement le déploiement de plusieurs parcs de réacteurs afin de remplir cette demande de production d'énergie :

- un premier parc composé uniquement de réacteurs à eau ordinaire ;
- un second parc composé de réacteurs à eau ordinaire et de réacteurs à spectre rapide (RNR) [8] ;
- un troisième parc composé de réacteurs à eau ordinaire et de réacteurs à sels fondus (RSF) à spectre thermique et basés sur la filière $^{232}\text{Th}/^{233}\text{U}$;
- un quatrième parc composé de réacteurs à eau ordinaire, de réacteurs à spectre rapide, et de réacteurs à sels fondus [8].

2.2 Les ressources naturelles en uranium et en thorium

Les ressources exploitables d'uranium naturel sont classées en catégories de coût. Les ressources déjà exploitées sont estimées à 2 millions de tonnes d'uranium (MtU) [9]. Les ressources assurées sont de 1,6 MtU pour la catégorie à 40 \$/kgU et de 2,6 MtU à 80 \$/kgU, ce qui représente 40 ans de consommation au niveau actuel du parc mondial. Les estimations des ressources totales en uranium naturel sont fonction des possibilités techniques et des coûts d'extraction. Actuellement, le

coût moyen d'exploitation de l'uranium est de 30 \$/kgU ; en prenant un coût de 400 \$/kgU, les ressources en uranium naturel peuvent être extrapolées à 23 MtU [9]. C'est cette valeur volontairement optimiste que nous avons prise comme réserves disponibles d'uranium naturel dans nos études de déploiement, alors que la plupart des études tablent sur des réserves de 8 à 16 MtU.

Comme l'uranium 238, le thorium 232 n'est pas fissile mais fertile : il peut être converti en uranium 233 qui est, lui, fissile. Les ressources naturelles en thorium sont importantes, puisque estimées deux à trois fois plus importantes que celles de l'uranium. Dans nos scénarios cependant, comme les réacteurs utilisés ne consomment qu'une faible part des ressources de matières fertiles, nous avons considéré les ressources de thorium et d'uranium naturels comme étant au même niveau initialement, afin de faciliter la comparaison des évolutions de ces deux quantités.

2.3 Utilisation des données de base dans les calculs paramétrés

Chaque année simulée de déploiement, des réacteurs nucléaires vont être mis en service jusqu'à remplir la demande énergétique mondiale fixée en objectif. Le choix des réacteurs à démarrer se fait comme suit :

- un réacteur de la filière la plus prioritaire est choisi ;
- les quantités de combustible nécessaire pour faire fonctionner ce réacteur sur toute sa durée de vie sont calculées ;
- si les stocks de matériaux sont suffisants à chaque instant de sa vie, ledit réacteur est mis en service, et cela se poursuit ainsi jusqu'à satisfaire la demande énergétique de l'année ;
- s'il manque du combustible pour faire fonctionner le réacteur à un moment quelconque de sa vie, des unités de fabrication de combustibles, des unités d'enrichissement et de retraitement vont être démarrées. Deux possibilités alors :
 - Les unités ont assez de matières premières (naturelles ou produites dans d'autres réacteurs déjà en fonctionnement) pour fabriquer le combustible nécessaire au fonctionnement du réacteur considéré. Celui-ci est alors démarré et l'on procède de même avec un autre réacteur de la filière la plus prioritaire jusqu'à remplir la demande énergétique de l'année.
 - Les ressources nécessaires à la fabrication du combustible s'épuisent avant la fin de vie de réacteur. On essaie alors de démarrer un réacteur d'une filière de priorité moindre, en suivant le même cheminement. S'il n'y a plus de réacteurs possibles, la demande énergétique mondiale ne peut être satisfaite pour l'année de déploiement considérée.

3 Parc de réacteurs à eau ordinaire

Nous avons d'abord considéré un scénario de production d'énergie d'origine nucléaire basé uniquement sur un parc de réacteurs modérés à l'eau ordinaire et dont le combustible contient de l'uranium enrichi. C'est en effet cette filière qui est majoritaire actuellement pour la production d'électricité d'origine nucléaire, en représentant environ 87% de la production mondiale. Les 13% restants sont produits par des réacteurs modérés à l'eau lourde, de type CANDU (CANadian Deutérium Uranium) et des réacteurs eau-graphite du type GLWR (Graphite Light Water Reactor) [6].

3.1 Réacteurs utilisés

Ces réacteurs fonctionnent en spectre thermique, utilisant de l'eau ordinaire comme modérateur. Deux types de tels réacteurs sont utilisés dans la simulation, représentant respectivement les réacteurs de 2^{ème} et de 3^{ème} générations : les réacteurs à eau pressurisée type REP français actuels, et le futur EPR européen ¹ (pour European Pressurized Reactor). Les caractéristiques générales de ces réacteurs sont décrites dans le tableau 4.

	REP	EPR
Puissance nominale en GWe	1.0	1.45
Facteur de charge	0,8	0,8
Date de début de la filière	1970	2010
Durée de vie d'un réacteur	40 ans	50 ans

TAB. 4 – *Caractéristiques générales des réacteurs à eau ordinaire utilisés.*

3.2 Caractéristiques des réacteurs existants

Pour les réacteurs existants (REP), le combustible utilisé est de l'uranium naturel enrichi (UOX). Les caractéristiques du combustible, les quantités de combustible et de rejets par GWe-an sont listés dans le tableau 5.

Des unités d'enrichissement ont été introduites dans la simulation afin de produire les combustibles des divers réacteurs à partir d'uranium naturel. Ces unités fournissent en sortie le combustible enrichi et l'uranium appauvri correspondant, aux taux d'enrichissement indiqués également dans le tableau 5.

¹L'EPR a été choisi comme exemple de réacteur de 3^{ème} génération. La prise en compte d'un autre réacteur de 3^{ème} génération ne modifierait pas les conclusions du présent scénario.

	REP
Type de combustible	UOX
Enrichissement en ^{235}U du combustible	3,5%
Enrichissement en ^{235}U de l'U appauvri rejeté lors de l'enrichissement	0,3%
Enrichissement en ^{235}U du combustible à retraiter en sortie de réacteur	1%
Quantité de combustible à charger	27,2 tonnes
Quantité d'U appauvri correspondante	179,8 tonnes
Quantité d'Uranium naturel correspondante	207 tonnes
Quantité d'Uranium usé après retraitement	26 tonnes
Quantité de Pu à retraiter	270 kg

TAB. 5 – *Caractéristiques des combustibles et des rejets des REP. Les quantités de matière sont données par GWe-an produit.*

	<u>Cas 1 :</u> sans Multirecyclage	<u>Cas 2 :</u> Multirecyclage Pu	<u>Cas 3 :</u> Multirecyclage Pu + A.M. (Np, Am, Cm)
Type de combustible	UOX	MOX-UE	MOX-UE
Enrichissement en ^{235}U du combustible	4,9%	4,5%	4,7%
Enrichissement en ^{235}U de l'U appauvri rejeté	0,25%	0,25%	0,25%
Enrichissement en Pu+A.M. du combustible	0%	2,1%	3,7%
Combustible en entrée dont Pu/Np/Am/Cm (kg)	13,6 tonnes 0/0/0/0	13,6 tonnes 285/0/0/0	13,6 tonnes 387/17/43/60
U naturel correspondant	138 tonnes	122 tonnes	126,3 tonnes
U appauvri correspondant	124,4 tonnes	108,7 tonnes	113,2 tonnes
Uranium usé récupéré après retraitement	12,6 tonnes	12,4 tonnes	12,3 tonnes
Pu produit	170 kg	285 kg	387 kg
Pu mis en stockage	170 kg	0 kg	0 kg

TAB. 6 – *Caractéristiques des combustibles et des rejets des futurs EPR [7]. Les quantités de matière sont données par GWe-an produit.*

3.3 Caractéristiques des futurs réacteurs

Pour le futur EPR, trois types de combustibles [7][8] ont été testés pour étudier l'impact résultant sur le scénario de déploiement du nucléaire (voir tableau 6) :

- un combustible similaire à celui présenté pour les REP ci-dessus, en uranium naturel enrichi ;
- un combustible basé sur le multi-recyclage du plutonium, composé de plutonium recyclé et d'uranium enrichi (dit MOX-UE) ;
- un combustible basé sur le multi-recyclage du plutonium, de l'américium, du neptunium et du curium, toujours sur de l'uranium enrichi comme base.

3.4 Scénarios de déploiement étudiés

Pour chacun des combustibles possibles de l'EPR, deux situations ont été étudiées et sont détaillées ci-dessous : la situation actuelle d'utilisation de l'uranium, et une situation d'utilisation optimisée des réserves en uranium.

3.4.1 Situation actuelle

La situation actuelle correspond à un rejet lors de la phase d'enrichissement du combustible de l'uranium appauvri à une teneur de 0,25 à 0,3% en ^{235}U , et le stockage de l'uranium retraité après son passage en centrale. Le scénario de déploiement de l'électronucléaire dans cette situation est illustré sur la figure 1, les ressources d'uranium naturel ainsi que les stocks constitués d'uranium appauvri et de plutonium sur la figure 2.

En conclusion, un déploiement du nucléaire dans cette situation est impossible avec les seuls réacteurs à eau ordinaire, du fait de l'épuisement trop rapide des ressources économiquement exploitables en uranium fissile naturel. Le parc électronucléaire s'arrête rapidement par manque de combustible. Cet arrêt a lieu plus ou moins tôt selon le combustible utilisé :

- L'utilisation d'un combustible de type UOX pour les EPR conduit dès 2030 à un doublement de la puissance produite par rapport à l'heure actuelle, le parc d'EPR remplaçant le parc actuel. Le développement du parc se poursuit jusqu'en 2060, avec une puissance maximale fournie de 2900 GWe. L'épuisement des réserves en uranium fissile naturel à cette date est illustrée sur les figures 1 et 2. Il est en effet impossible de démarrer de nouveaux réacteurs au-delà de 2060, l'uranium restant étant nécessaire au fonctionnement des réacteurs déjà démarrés. Dans la réalité, ce brusque décrochage dans la production d'énergie devrait être lissé par divers facteurs (prix de l'uranium, recherches de nouveaux gisements, ...).

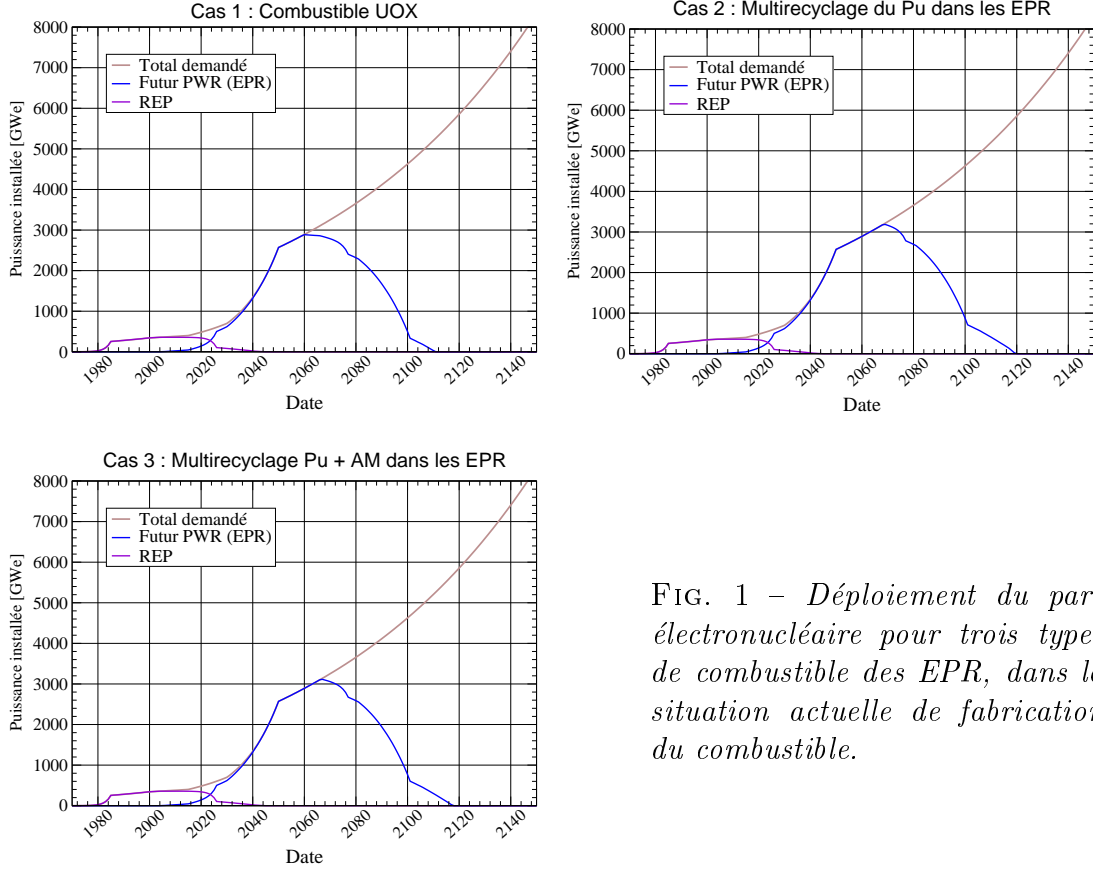


FIG. 1 – Déploiement du parc électronucléaire pour trois types de combustible des EPR, dans la situation actuelle de fabrication du combustible.

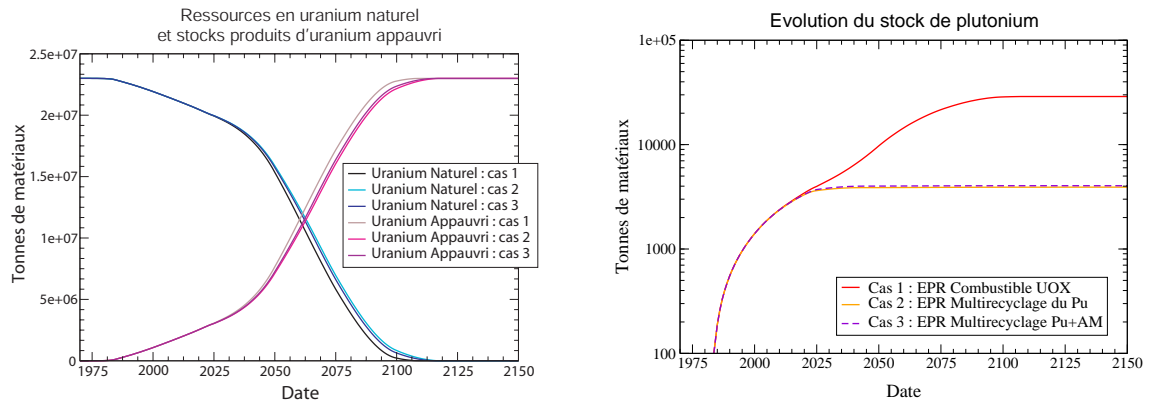


FIG. 2 – Ressources d'uranium naturel, et stocks d'uranium appauvri et de plutonium pour trois combustibles des EPR : EPR à combustible UOX (cas 1), EPR avec multi-recyclage du Pu (cas 2), et EPR avec multi-recyclage du Pu et des actinides mineurs (cas 3).

- Un multi-recyclage du plutonium dans du combustible enrichi des EPR permet le déploiement du parc jusqu'en 2070 et une puissance fournie maximale de 3200 GWe. L'enrichissement en ^{235}U nécessaire pour produire 1 GWe est moins élevé du fait de la présence d'un autre fissile, le Pu. Les réserves en uranium fissile naturel s'épuisent un peu moins rapidement. Par contre, si l'on souhaite inclure dans le parc des réacteurs utilisant le Pu comme combustible, ce multirecyclage pose problème car il utilise les réserves de Pu d'une manière peu efficace, dégradant la qualité du plutonium sans le consommer entièrement.
- Un multirecyclage des actinides mineurs (Np, Am, Cm) en plus du Pu dans les EPR est moins intéressant en terme de production d'énergie que le seul multirecyclage du Pu. Il faut davantage enrichir l'uranium servant de base au combustible, du fait de matières consommant des neutrons. Les réserves en uranium fissile naturel sont épuisées plus tôt que dans le cas précédent : le déploiement s'arrête en 2065 avec une puissance maximale fournie de 3100 GWe seulement. Par conséquent, ce combustible n'a plus été considéré dans la suite des études de scénarios.

3.4.2 Utilisation optimisée des réserves en uranium

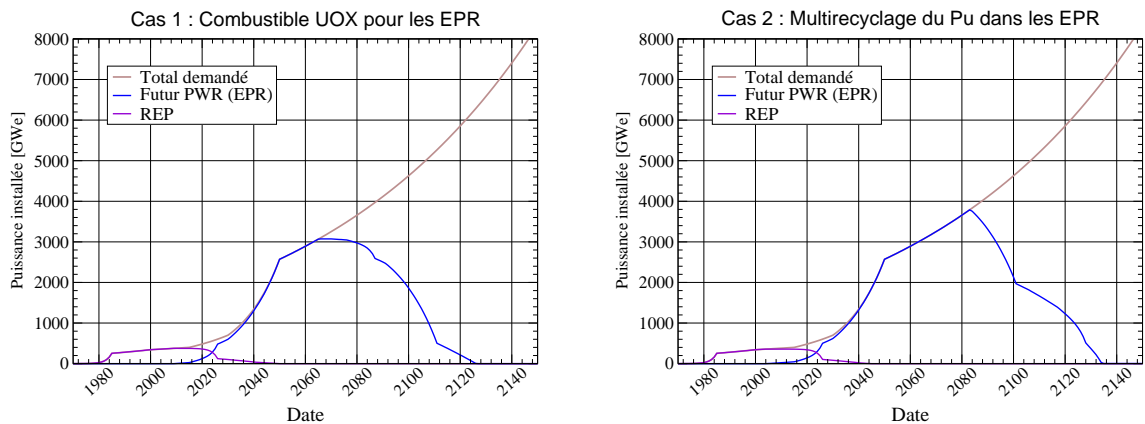


FIG. 3 – Déploiement du parc électronucléaire pour deux types de combustible des EPR, avec une optimisation de l'utilisation des réserves d'uranium : EPR à combustible UOX (cas 1) et EPR avec multi-recyclage du Pu (cas 2).

Actuellement, le cycle du combustible est ouvert, le combustible irradié n'est pas recyclé mais stocké en attente d'un recyclage éventuel. Certains pays, comme la France, ont choisi l'option du retraitement ; le plutonium et l'uranium sont séparés dans le combustible irradié. Une partie du plutonium est recyclé dans des combustibles MOX, l'uranium retraité est pour le moment stocké, en attente d'une valorisation future. Une possibilité serait donc de re-enrichir cet uranium retraité pour en faire du combustible. Il serait dans le même temps possible de rejeter l'uranium

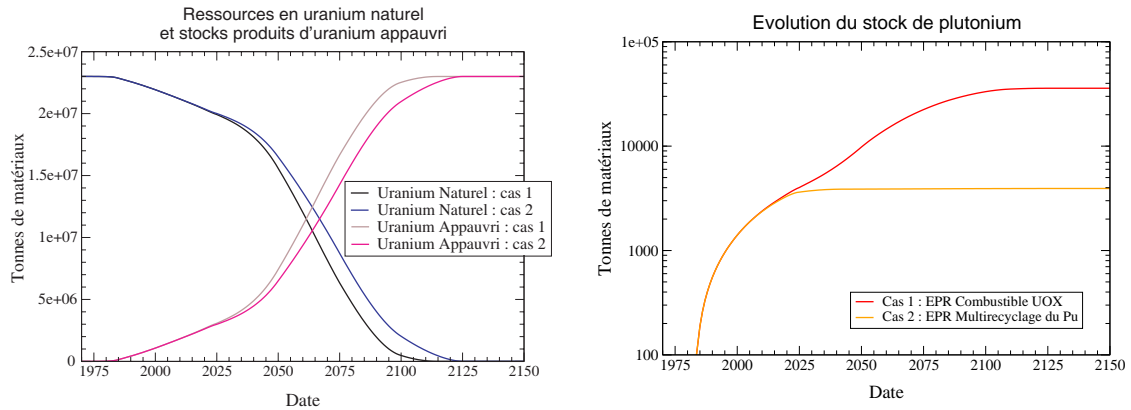


FIG. 4 – *Ressources d'uranium naturel et stock de plutonium avec une utilisation optimisée de l'uranium, pour deux combustibles des EPR : EPR à combustible UOX (cas 1) et EPR avec multi-recyclage du Pu (cas 2).*

appauvri avec une teneur de 0,1% en ^{235}U seulement. Cette possibilité devient rentable lorsque les prix des énergies fossiles et de l'uranium naturel augmentent.

Le scénario de déploiement de l'électronucléaire dans cette situation, et les ressources en uranium naturel, et les stocks d'uranium appauvri et de plutonium, sont illustrés sur les figures 3 et 4 :

- dans le cas 1, l'utilisation d'un combustible uranium enrichi pour les EPR, le développement du parc est possible jusqu'en 2065, avec une puissance maximale fournie de 3100 GWe ;
- dans le cas 2, le multi-recyclage du plutonium dans du combustible enrichi des EPR permet ici le déploiement du parc jusqu'en 2085 et une puissance fournie maximale de 3900 GWe, soit un gain de 15 ans par rapport à la section précédente avec le même combustible.

Ce dernier scénario est le plus optimisé pour un parc de réacteurs entièrement à eau ordinaire, or la demande énergétique mondiale ne peut être satisfaite au-delà de 2085, du fait de l'épuisement rapide des ressources en uranium fissile naturel, incompatible avec la notion de développement durable dans le contexte actuel où d'autres solutions de production de l'énergie (fusion, ...) n'en sont qu'au niveau de la recherche.

La situation la plus favorable consiste donc à multi-recycler le plutonium. Ce multi-recyclage, qui est en soi une opération très complexe et coûteuse, a comme second inconvénient d'amener à une fin quasi-définitive du nucléaire. En effet, les ressources fissiles naturelles (^{235}U) seraient complètement épuisées vers 2100, et le plutonium issu du multi-recyclage est dégradé : il comporte trop d'éléments peu fissiles qui empêchent de l'utiliser seul pour alimenter un réacteur.

Il est donc nécessaire d'envisager une utilisation optimale proche de 100% du minerai ; ceci est possible grâce au principe de régénération. Un développement durable de l'électro-nucléaire nécessite donc de se tourner rapidement, dans les 10 à 15 ans du fait des limitations des ressources, vers d'autres filières de réacteurs, capables au moins de régénérer leur matière fissile. Nous allons considérer par la suite la filière basée sur le cycle de combustible U/Pu en spectre rapide (sections 4 et 6), et la filière basée sur le cycle du combustible Th/²³³U en spectre thermique (sections 5 et 6).

4 Parc composé de réacteurs à eau ordinaire et de réacteurs à neutrons rapides (RNR)

4.1 Caractéristiques des RNR utilisés

Parmi les six systèmes retenus par le forum international Génération IV, quatre sont à spectre rapide. Deux de ces réacteurs à neutrons rapides, ceux étudiés par le CEA, ont été retenus dans cette étude : le premier à caloporteur métal liquide (type SuperPhénix), le second à caloporteur gaz. Les caractéristiques de ces deux types de réacteurs sont listées dans le tableau 7 : ils sont tous deux considérés comme sur-générateurs dans ce scénario. Les combustibles sont à base d'uranium appauvri et de plutonium. Les chargements de combustible se font tous les 5 ou 15 ans selon le type de réacteur², de même pour le déchargement du combustible. De l'uranium appauvri est consommé par le réacteur, pour la régénération et la surgénération du plutonium. Cette alimentation en uranium appauvri dépend de la température du réacteur, donc de son rendement thermodynamique. La valeur du rendement choisie pour tous les RNR de nos scénarios est de 40%.

Enfin, nous avons également considéré un troisième type de réacteur à neutrons rapides, fonctionnant avec de l'²³⁵U comme matière fissile au démarrage, et produisant en sortie la même quantité de plutonium surgénéré que les RNR à caloporteur métal liquide présentés précédemment.

L'avantage de ce réacteur est de fonctionner sans plutonium en entrée, donc sans nécessiter le démarrage de réacteurs à eau ordinaire lors de pénurie de plutonium. Or l'utilisation de l'²³⁵U est davantage optimisée dans un RNR que dans un réacteur à eau ordinaire : il faut au total 15 tonnes d'²³⁵U pour démarrer directement un RNR, alors que la production dans un EPR du plutonium indispensable au démarrage d'un RNR à caloporteur métal liquide (soit 2 charges de 6 tonnes) nécessite de consommer 45 tonnes d'²³⁵U.

²La périodicité de remplacement du combustible dépend essentiellement de la puissance spécifique dans les éléments combustibles, puissance spécifique qui elle-même dépend du caloporteur.

	Caloporteur métal liquide	Caloporteur gaz
Puissance nominale (GWe)	1.0	0.3
Date de début de la filière	2025	2025
Durée de vie d'un réacteur	50 ans	60 ans
Combustible (par charge) :		
Quantité d'U appauvri	48 tonnes	51 tonnes
Quantité de Pu	6 tonnes	7 tonnes
Durée de retraitement	5 ans	5 ans
Fréquence de charge	5 ans	15 ans
Nombre de charges	2	2
Surgénération (réacteur-an) :		
Alimentation U appauvri	1 tonne	300 kg
Production de Pu	300 kg	100 kg

TAB. 7 – *Caractéristiques des réacteurs surgénérateurs à neutrons rapides utilisés.*

Les caractéristiques d'un réacteur à neutrons rapides démarré à l' ^{235}U sont résumées dans la table 8.

Les scénarios de déploiement correspondants sont détaillés dans les parties 4.3 à 4.5 de cette section.

4.2 Caractéristiques des réacteurs à eau ordinaire utilisés

Concernant cette filière U/Pu rapide, le tableau 7 montre que l'inventaire initial de matière fissile nécessaire au démarrage d'un réacteur à neutrons rapides de 1 GWe est à peu près égal à la quantité de plutonium produit par un réacteur standard actuel de type REP pendant toute sa durée de vie. Un déploiement d'un tel parc incluant des RNR impose donc de ne pas multirecycler le Pu produit précédemment dans les EPR, d'importantes quantités de Pu étant nécessaires au déploiement de la filière RNR.

Les réacteurs à eau ordinaire utilisés dans ce scénario seront les REP actuels (cf. définition en section 3), et les réacteurs futurs EPR à combustible uranium enrichi comme défini dans le cas 1 du tableau 6.

4.3 Scénario basé sur des RNR avec caloporteur métal liquide

Le résultat de ce scénario de déploiement d'un parc électronucléaire composé de réacteurs à eau ordinaire et de RNR à caloporteur métal liquide, en terme de nombres

	RNR démarré à l'^{235}U (caloporteur métal liquide)
Puissance nominale (GWe)	1.0
Date de début de la filière	2025
Durée de vie d'un réacteur	50 ans
Combustible (par charge) : Quantité d'U enrichi Enrichissement en ^{235}U Durée de retraitement	50 tonnes 15% 5 ans
Fréquence de charge Nombre de charges	5 ans 2
Surgénération (réacteur-an) : Alimentation U appauvri Production de Pu	1 tonne 300 kg
Déchargement final du réacteur : Quantité de Pu / charge	6 tonnes

TAB. 8 – *Caractéristiques des réacteurs surgénérateurs à neutrons rapides démarrés avec un combustible à l' ^{235}U .*

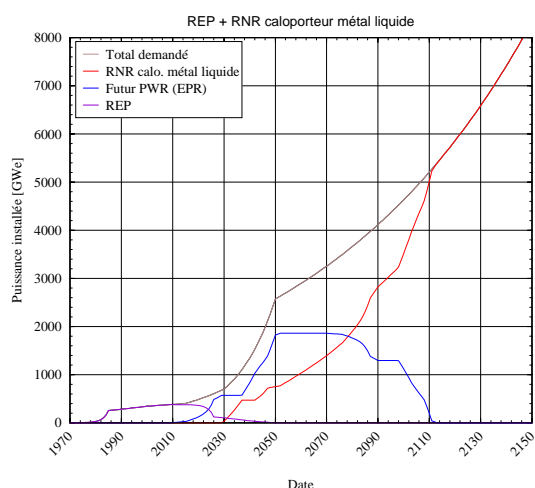


FIG. 5 – *Déploiement du parc électronucléaire composé de réacteurs à eau ordinaire et de RNR à caloporteur métal liquide.*

de réacteurs, de ressources d'uranium naturel et de stocks d'uranium appauvri et de plutonium, sont présentés sur les figures 5 et 6.

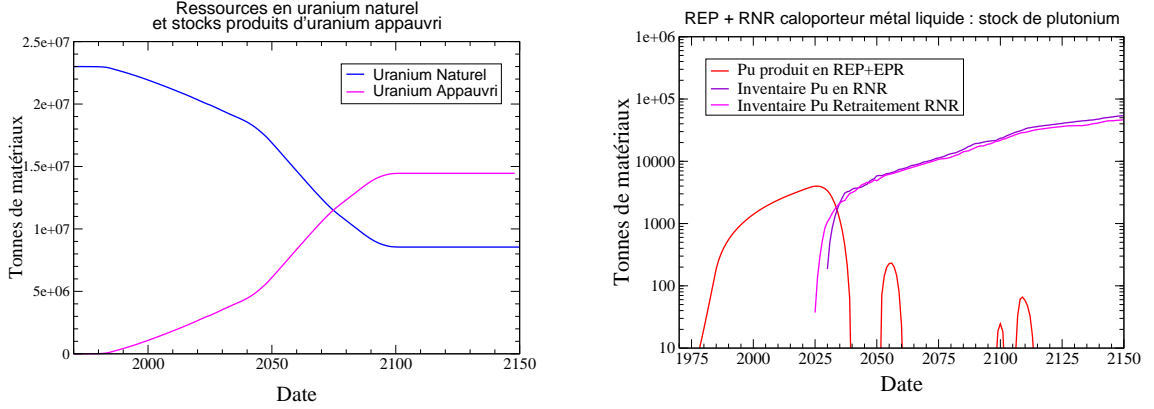


FIG. 6 – *Ressources d'uranium naturel, et stocks d'uranium appauvri et de plutonium correspondants au déploiement d'un parc de réacteurs à eau ordinaire et de RNR à caloporteur métal liquide.*

Dans ce scénario, la production de Plutonium dans les réacteurs à eau légère pour l'alimentation des RNR nécessite environ 5 fois le parc actuel de REP. Le plutonium ainsi produit par les réacteurs à eau ordinaire est suffisant pour démarrer la filière des RNR, puis la surgénération dans les RNR permet un plein déploiement du parc de réacteurs à neutrons rapides qui deviennent majoritaires pour la production d'énergie à partir de 2060, tandis que le nombre d'EPR commence à diminuer.

Les conclusions de ce scénario sont les suivantes [8] :

- Le démarrage de plus de 1500 réacteurs de type EPR est nécessaire ici, conduisant à la consommation de 15 millions de tonnes d'uranium naturel en 2100. Il reste alors 35% des réserves originelles d'uranium fissile naturel disponibles.
- Plus de 30000 tonnes de plutonium sont présentes en 2100 en réacteurs, plus une quantité équivalente en retraitement, soit de grandes quantités de matières fissiles.

En conclusion, ce scénario de déploiement présente une gestion extrêmement complexe, tant au niveau du combustible que des déchets produits. De plus, le présent scénario serait incompatible avec une demande mondiale en énergie nucléaire plus importante que celle envisagée ici, hypothèse pourtant assez probable (cf. section 2.1).

4.4 Scénario basé sur des RNR avec caloporteur gaz

Le résultat de ce scénario de déploiement d'un parc électronucléaire composé de réacteurs à eau ordinaire et de RNR à caloporteur gaz, en terme de puissance produite, de ressources d'uranium naturel et de stocks d'uranium appauvri et de

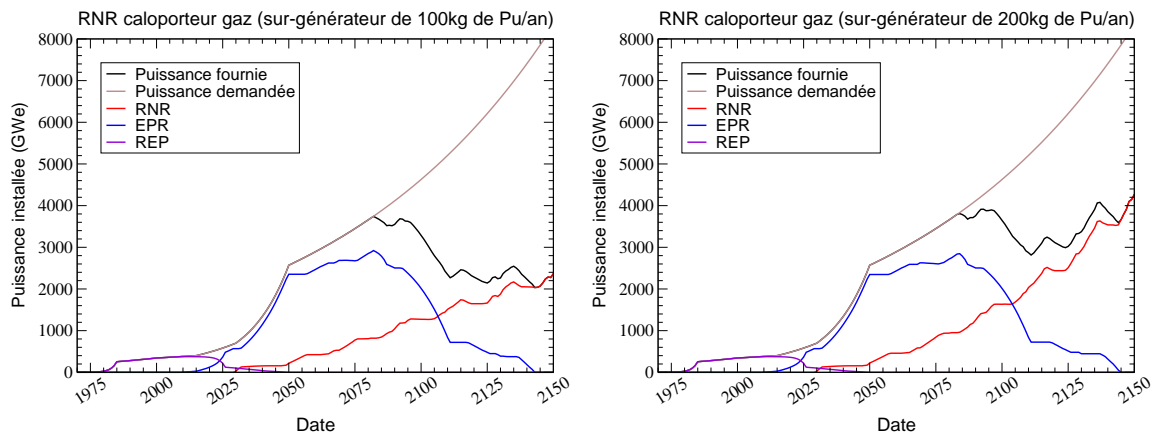


FIG. 7 – Déploiements du parc électronucléaire composé de réacteurs à eau ordinaire et de RNR à caloporteur gaz.

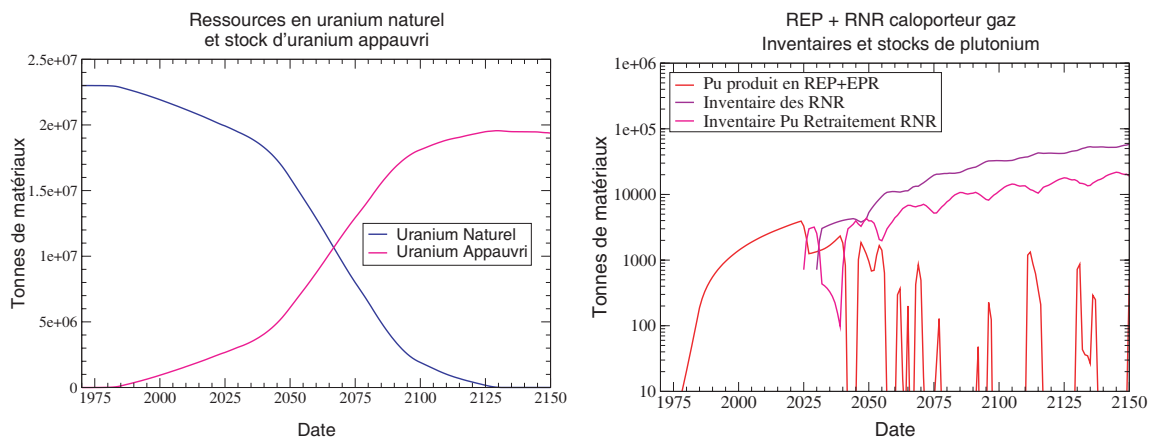


FIG. 8 – Ressources d'uranium naturel, et stocks d'uranium appauvri et de plutonium correspondants au déploiement d'un parc de réacteurs à eau ordinaire et de RNR à caloporteur gaz.

plutonium, est présenté sur les figures 7 (à gauche) et 8.

Dans ce scénario, le plutonium produit par les réacteurs à eau ordinaire n'est pas suffisant pour démarrer la filière des RNR. Il est alors nécessaire de faire fonctionner des EPR producteurs de Pu jusqu'à épuisement des ressources en uranium fissile naturel, épuisement qui a lieu vers 2125. La demande énergétique mondiale n'est alors pas satisfaite à compter de 2080. Même en doublant la sur-génération de plutonium dans ces RNR caloportés au gaz (figure 7 à droite), hypothèse irréaliste car correspondant à la limite théorique de production de Pu sans tenir compte des pertes de neutrons dans le réacteur, la demande énergétique mondiale ne peut être satisfaite et l'uranium fissile naturel vient à manquer à partir de 2130. Un scénario basé sur les RNR caloportés au gaz ne peut donc satisfaire le développement durable puisque cela mène rapidement à un épuisement des réserves d'uranium fissile naturel.

4.5 Scénario basé sur des RNR à caloporteur métal liquide, démarrés au Plutonium ou à l' ^{235}U

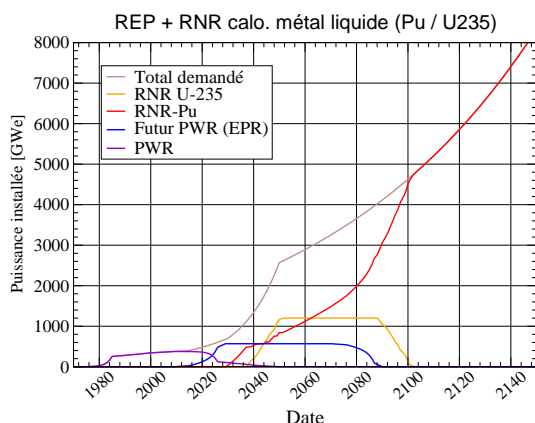


FIG. 9 – *Déploiement du parc électronucléaire composé de réacteurs à eau ordinaire et de RNR à caloporteur métal liquide alimentés au Pu ou à l' ^{235}U .*

Dans ce scénario, les RNR démarrés au plutonium sont prioritaires dans le but de consommer le plutonium. En cas de manque de combustible plutonium, des RNR démarrés à l' ^{235}U sont alors utilisés prioritairement, et non plus des EPR comme dans le premier scénario présenté en section 4.3. Le résultat de ce scénario de déploiement d'un parc électronucléaire composé de réacteurs à eau ordinaire, et de RNR démarrés au Pu ou à l' ^{235}U , en terme de puissance produite, de ressources d'uranium naturel et de stocks d'uranium appauvri et de plutonium, est représenté sur les figures 9 et 10.

Les conclusions de ce scénario sont assez proches de celles du scénario 4.3, à une différence : la production de plutonium nécessite l'utilisation de seulement 3 fois le parc actuel de REP en RNR démarrés à l' ^{235}U , et ainsi une consommation plus faible des ressources d'uranium naturel. Environ 55% des réserves d'uranium fissile naturel sont encore disponibles en 2100. De plus, ici, le renouvellement du parc actuel de réacteurs à eau légère se fait par un nombre presque équivalent d'EPR, qui

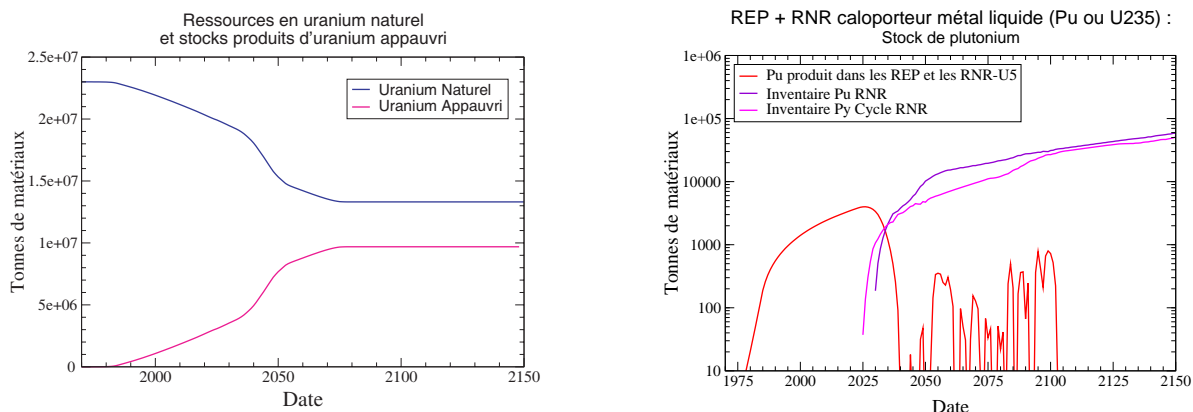


FIG. 10 – *Ressources d'uranium naturel, et stocks d'uranium appauvri et de plutonium correspondants au déploiement d'un parc de réacteurs à eau ordinaire et de RNR à caloporteur métal liquide démarrés au Pu ou à ^{235}U .*

assurent la transition avant le démarrage de la filière RNR.

Ce scénario de déploiement peut être utile pour des pays ne disposant pas de plutonium, par exemple n'ayant pas, ou peu, de réacteurs à eau légère actuellement en fonctionnement.

Cependant, un parc de RNR démarrés à ^{235}U nécessiterait la mise en place à grande échelle d'une industrie d'enrichissement de l'uranium à 15% en matière fissile.

De plus, le présent scénario présente toujours les mêmes quantités de plutonium dans le cycle et d'actinides mineurs dans les inventaires, d'où une gestion toujours complexe nécessaire. De plus, en cas d'arrêt du nucléaire, par exemple remplacé par une autre source d'énergie (fusion, ...), le problème se pose de l'incinération du plutonium présent en grandes quantités (60000 tonnes au total en 2100) dans les réacteurs et dans les unités de retraitement. Tout réacteur de 1 GWe, transformé en incinérateur, ne peut consommer qu'environ une tonne de plutonium par an au maximum. Une incinération du plutonium nécessiterait donc 60000 années-réacteurs, à comparer aux 120000 années-réacteurs du parc RNR de ce scénario en 2100. L'incinération des stocks de plutonium produits ici semble donc extrêmement difficile, longue et coûteuse, voire irréalisable !

5 Parc composé de réacteurs à eau ordinaire et de réacteurs à sels fondus (RSF)

Les sections efficaces de capture du ^{232}Th , et de fission et de capture de ^{233}U , sont telles qu'il est possible d'obtenir la régénération, voire la surrégénération du

combustible, en spectre thermique comme en spectre rapide. La régénération peut être obtenue avec beaucoup moins de matière fissile avec des neutrons thermiques, d'où notre choix dans cette étude de réacteurs à sels fondus basés sur le cycle ^{232}Th (fertile)/ ^{233}U (fissile), en spectre thermique. Ces réacteurs à sels fondus ou RSF sont un des six systèmes retenus par le forum international Génération IV.

5.1 Réacteurs à sels fondus utilisés : le “Thorium Molten Salt Reactor”

Dans tout scénario composé de réacteurs basés sur le cycle Th/U, il est nécessaire de produire ^{233}U , matière fissile non disponible actuellement. En effet, ^{233}U n'est ni présent naturellement ni produit dans les réacteurs actuels. Par ailleurs, la solution consistant à démarrer les RSF en spectre thermique avec du combustible contenant d'autres matières fissiles comme du plutonium ou de ^{235}U , ainsi que du thorium afin de permettre la production d' ^{233}U , n'est pas satisfaisante [11]. En effet :

- un démarrage au plutonium conduit à une production excessive d'actinides mineurs, et notamment de ^{244}Cm ;
- un démarrage à ^{235}U souffre du même problème si ^{235}U est mélangé à de ^{238}U ; on constate de plus un empoisonnement à ^{236}U qui bloque complètement le fonctionnement du réacteur pendant près de 50 ans.

Il faut donc envisager de “convertir” le plutonium ou ^{235}U en ^{233}U , en irradiant du thorium dans des réacteurs standard : certains neutrons produits par les fissions du réacteur seront capturés par le thorium pour donner après plusieurs désintégrations de ^{233}U . ^{233}U sera ainsi produit par surgénération dans des couvertures en thorium placées soit dans les EPR (section suivante), soit dans les RNR, soit dans les deux types de réacteurs (section 6). Peu d'informations précises sur cette production d' ^{233}U dans les EPR et les RNR sont disponibles à ce jour, des études sont en cours sur ce sujet dans le Groupe de Physique des Réacteurs du LPSC de Grenoble ainsi que dans le groupe de Physique de l'Aval du Cycle et de la Spallation de l'IPN d'Orsay.

Le type de réacteurs à sels fondus considéré dans cette étude est nommé “Thorium Molten Salt Reactor” ou TMSR. Ce concept est détaillé dans les deux références [8] et [10]. Ces réacteurs sont iso-générateurs ou sur-générateurs. Afin d'améliorer les capacités de régénération du combustible, une couverture radiale en thorium est ajoutée au coeur : les fuites de neutrons sont ainsi utilisées pour produire de ^{233}U .

Les caractéristiques des TMSR sont résumées dans le tableau 9. Le chargement du combustible se fait en une fois, en début de vie du réacteur, puis du thorium est ajouté régulièrement pour assurer l'iso-génération. La moitié de la charge de Thorium est présente dans le coeur du réacteur, l'autre moitié étant dans l'unité de

	TMSR
Puissance nominale (GWe)	1.0
Date de début de la filière	2030
Durée de vie d'un réacteur	50 ans
Caractéristiques du combustible :	
Quantité de Thorium	58 tonnes
Matière fissile dans le combustible (^{233}U)	3% / 1.7 tonnes
Alimentation en Thorium	1 tonne
Quantité d' ^{233}U produit	1 tonne(iso-générateur)
Quantité de Pu produit	4 kg
Couverture Thorium : quantité de Thorium	21 tonnes

TAB. 9 – *Caractéristiques des RSF considérés, du type TMSR. Les quantités de matière sont données par GWe.an produit.*

retraitement associée.

5.2 Réacteurs à eau ordinaire utilisés

	Combustible Mox Thorié
Puissance nominale (GWe)	1.45
Date de début de la filière	2010
Durée de vie d'un réacteur	50 ans
Enrichissement en ^{235}U du combustible	4.5%
Enrichissement en ^{235}U de l'U appauvri rejeté	0.25%
Quantité de combustible	13.6 tonnes
Uranium utilisé à retraiter	12.4 tonnes
Production d' ^{233}U :	
Alimentation en thorium	133 kg
Quantité d' ^{233}U produit	133 kg

TAB. 10 – *Caractéristiques des futurs EPR, utilisés pour la production d' ^{233}U . Les quantités de matière sont données par GWe.an produit.*

Les réacteurs à eau ordinaire utilisés dans ce scénario pour assurer la transition seront les REP actuels, et les réacteurs futurs EPR à combustible uranium enrichi avec multi-recyclage du plutonium comme défini dans le cas 2 du tableau 6, mais produisant de l' ^{233}U . Pour cela, du combustible MOX thorié est ajouté au coeur. Ce choix de multi-recyclage pour les EPR provient de l'absence, dans le présent

scénario, de réacteurs capables d'utiliser le Pu, et de la nécessité de ne pas constituer de stock trop important de cette matière. Les actinides mineurs sont supposés être pris en charge par d'autres réacteurs ultérieurs, tels des réacteurs pilotés par accélérateur (ADS) ou des réacteurs de génération IV.

Les caractéristiques de ces EPR producteurs d' ^{233}U sont listées dans le tableau 10.

5.3 Résultat du déploiement du parc composé de réacteurs à eau ordinaire et de réacteurs à sels fondus

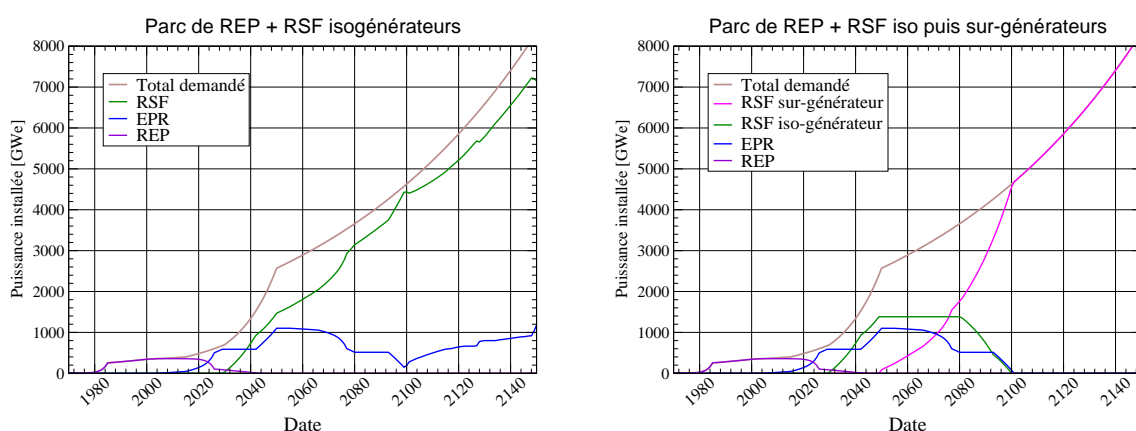


FIG. 11 – *Déploiement du parc électronucléaire composé de réacteurs à eau ordinaire et de réacteurs à sels fondus iso-générateurs (gauche) ou iso- puis sur-générateurs (droite).*

Dans ce scénario, illustré sur la figure 11 (gauche), la demande énergétique est bien assurée, mais en consommant plus de la moitié des réserves d'uranium fissile naturel (figure 12). En effet, un parc important de réacteurs à eau légère fonctionne en continu afin de produire l' ^{233}U nécessaire au démarrage des RSF. Ce problème peut être réglé, en prenant en compte une capacité de sur-génération d'une dizaine de kilogrammes d' ^{233}U dans les RSF à compter de 2050. Ce délai de 20 ans entre le début de la filière RSF et le démarrage de RSF sur-générateurs correspond au temps de développements techniques nécessaires pour optimiser les RSF. Le parc ainsi obtenu, représenté sur la figure 11 (droite), ne consomme cette fois qu'environ 1/3 des réserves en uranium fissile naturel comme illustré sur la figure 12. Des tests de sensibilité ont montré qu'une légère variation de production d' ^{233}U dans les réacteurs à eau ordinaire, ou une variation d'inventaire en ^{233}U dans les RSF, ne modifie pas sensiblement les conclusions de ce scénario.

Un problème demeure : le stock de plutonium produit par les réacteurs à eau légère, bien que vingt fois moindre que celui du scénario précédent (section 4.5), devra être incinéré. Une solution est étudiée dans la section suivante, sous forme d'un scénario

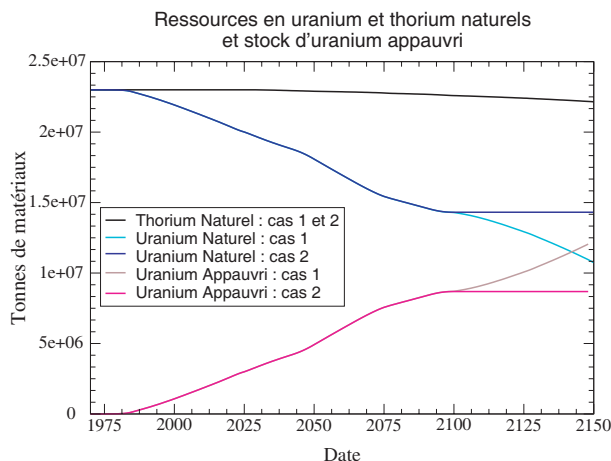


FIG. 12 – *Ressources en uranium et thorium naturels, et stock d'uranium appauvri, correspondants au parc composé de réacteurs à eau ordinaire et de réacteurs à sels fondus iso-générateurs (cas 1), ou de réacteurs à sels fondus iso- puis sur-générateurs (cas 2).*

incluant également des réacteurs à neutrons rapides, qui vont utiliser plus efficacement ce plutonium et permettre de fermer le cycle du combustible.

6 Parc composé de réacteurs à eau ordinaire, de RNR et de RSF

Le présent scénario, optimisé, fait appel aux trois types de réacteurs vus dans les sections précédentes, afin d'opérer une transition efficace du parc actuel vers un parc durable, utilisant la régénération. Dans ce scénario, l' ^{233}U nécessaire aux réacteurs à sels fondus est produit par surgénération dans des couvertures solides en thorium, placées à la fois dans les EPR et dans les RNR du parc.

6.1 Réacteurs à eau ordinaire utilisés

Les réacteurs à eau ordinaire utilisés dans ce scénario pour assurer la transition sont les REP actuels et les réacteurs futurs de type EPR à combustible uranium enrichi, sans multi-recyclage ici ni du plutonium ni des actinides mineurs, comme défini dans le cas 1 du tableau 6, mais produisant de l' ^{233}U . Pour cela, une couverture de thorium est ajoutée au cœur.

Ce choix de ne pas multi-recycler le Pu et les actinides mineurs dans les EPR provient de la présence, dans ce scénario, de réacteurs capables d'utiliser ces matériaux de manière plus efficace, les RNR.

Les caractéristiques de ces EPR producteurs d' ^{233}U sont listées dans le tableau 11.

	Combustible Uox
Puissance nominale (GWe)	1.45
Date de début de la filière	2010
Durée de vie d'un réacteur	50 ans
Enrichissement en ^{235}U du combustible	4.9%
Enrichissement en ^{235}U de l'U appauvri rejeté	0.25%
Quantité de combustible	13.6 tonnes
Uranium utilisé à retraiter	12.6 tonnes
Pu produit à retraiter	130 kg
Production d'^{233}U :	
Alimentation en thorium	130 kg
Quantité d'^{233}U produit	130 kg

TAB. 11 – *Caractéristiques des futurs EPR, utilisés pour la production d' ^{233}U . Les quantités de matière sont données par GWe.an produit.*

6.2 Réacteurs à neutrons rapides utilisés

Seul un des types de réacteurs à neutrons rapides présentés en section 4 a été retenu ici : les réacteurs à caloporteur métal liquide, dont les caractéristiques sont les mieux connues. Les RNR sont ici sous-générateurs en plutonium mais sur-générateurs en ^{233}U , afin de consommer les stocks de plutonium tout en produisant de l' ^{233}U nécessaire au démarrage de la filière RSF.

Les caractéristiques de ces RNR sont listées dans le tableau 12.

6.3 Réacteurs à sels fondus utilisés : TMSR

Les réacteurs à sels fondus considérés ici sont de type TMSR, présentés dans la section précédente et dont les caractéristiques sont résumées dans le tableau 9. L' ^{233}U nécessaire au démarrage des TMSR est produit ici à la fois dans des EPR et dans des RNR. Des RNR fonctionnant durant tout le scénario, de l' ^{233}U sera toujours disponible et il n'est pas nécessaire de le sur-générer dans les TMSR. Par conséquent, nous utiliserons des TMSR uniquement iso-générateurs.

	Caloporteur métal liquide
Puissance nominale (GWe)	1.0
Date de début de la filière	2025
Durée de vie d'un réacteur	50 ans
Combustible (par charge) :	
Quantité d'U appauvri	48 tonnes
Matière fissile dans le combustible (Pu)	11% / 6 tonnes
Fréquence de charge	5 ans
Nombre de charges	2
Alimentation U appauvri / an	1 tonne
Alimentation en Plutonium / an	200 kg
Alimentation en Thorium / an	500 kg
Production d' ^{233}U / an	500 kg

TAB. 12 – *Caractéristiques des réacteurs surgénérateurs à neutrons rapides produisant de ^{233}U , utilisés dans ce scénario.*

6.4 Résultat du déploiement du parc avec des réacteurs à eau légère, des RNR à caloporteur métal liquide, et des TMSR

Dans ce scénario, comme représenté sur la figure 13, le remplacement du parc actuel est effectué en 2030 par des réacteurs à eau légère type EPR. Ces réacteurs à eau légère sont ensuite remplacés par des RNR et des TMSR et s'arrêtent vers 2080. La transition vers les réacteurs de génération 4, et donc vers des systèmes durables, est alors achevée.

Par ailleurs, la production d' ^{233}U nécessaire au démarrage de la filière RSF est assurée par seulement l'équivalent du parc actuel de réacteurs à eau légère et un parc identique de RNR. Les réacteurs à sels fondus sont ensuite dominants à partir de 2040, et leur capacité de régénération permet un développement réussi de l'énergie nucléaire au-delà.

Concernant le stock de plutonium produit dans le scénario, la figure 14 (droite) montre que le stock maximal constitué, présent en inventaire des RNR, est ici dix fois moindre que dans le scénario de déploiement utilisant uniquement les réacteurs à eau légère et les RNR à caloporteur métal liquide.

De plus, afin de consommer le stock de plutonium produit dans les réacteurs à eau légère, nous avons choisi de mettre le démarrage de RNR prioritaire sur tous les autres réacteurs tant que du plutonium est disponible. La figure 14 (droite) montre que les stocks de plutonium accumulés avant le démarrage de la filière RNR est réduit d'un facteur 2 en 2100.

Les RNR permettent dans ce scénario de fermer le cycle de combustible U/Pu.

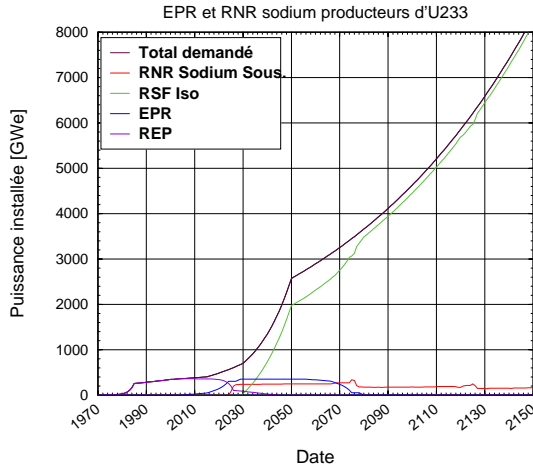


FIG. 13 – *Déploiement du parc électronucléaire composé de réacteurs à eau ordinaire, de RNR à caloporteur métal liquide et de TMSR.*

On voit également sur la figure 13 que la demande énergétique mondiale est satisfaite tout au long du scénario, et ce (figure cf. 14 à gauche) sans consommer toutes les réserves naturelles d'uranium et de thorium. Seul un tiers de l'uranium fissile naturel et une part négligeable du thorium naturels sont nécessaires pour la durée entière du déploiement. De plus, une demande énergétique nettement plus forte pourrait être satisfaite sans problème.

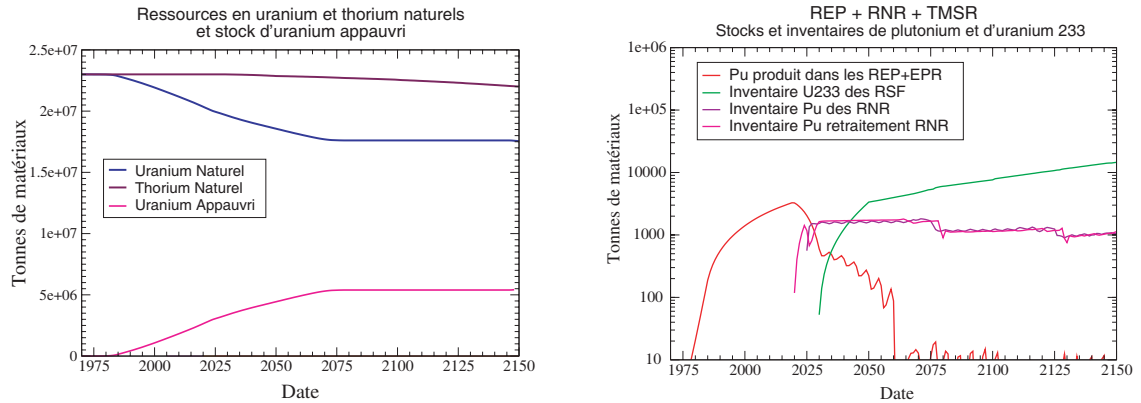


FIG. 14 – *Ressources en uranium et de thorium naturels, et stocks d'uranium appauvri et de plutonium et d' ^{233}U , correspondants au déploiement d'un parc de réacteurs à eau ordinaire, de RNR à caloporteur métal liquide et de TMSR.*

En conclusion, ce scénario, qui combine les trois types de réacteurs envisagés dans cette étude, semble de loin le plus efficace. Il permet un déploiement, et également un arrêt si nécessaire, plus rapide et donc plus souple. En effet, les TMSR utilisent peu de matière fissile pour fonctionner. Un TMSR, transformé en incinérateur, peut de plus brûler jusqu'à une tonne d' ^{233}U par an soit presque sa charge complète en matière fissile, ce qui peut permettre un arrêt du nucléaire sans laisser de stocks de matières fissiles tels que ceux du scénario 4.5.

Par ailleurs, les quantités de plutonium et d'actinides mineurs produits sont signi-

ficativement plus faibles, de plusieurs ordres de grandeur, que dans les scénarios présentés précédemment. Cela implique une gestion plus simple, donc plus facilement réalisable, des déchets et par conséquent de tout le déploiement.

On remarquera que, s'il s'avérait nécessaire de redémarrer le nucléaire, après un arrêt suivi d'incinération, la quantité d'uranium fissile naturel disponible reste ici suffisamment importante pour que cela soit possible.

Ce scénario met en évidence l'importance du cycle du combustible $\text{Th}/^{233}\text{U}$ de manière générale, et plus particulièrement du concept de réacteur à sels fondus : un déploiement durable et efficace de l'énergie nucléaire est obtenu, optimisant l'utilisation des matières fissiles et la production de déchets à gérer.

Il est à noter que l'on peut envisager une palette de scénarios intermédiaires entre le parc composé de réacteurs à eau ordinaire puis de réacteurs à neutrons rapides uniquement (section 4), et le présent parc composé des trois types de réacteurs mais avec une dominante de réacteurs à sels fondus. Ces scénarios contiendraient plus ou moins de RNR, avec donc la constitution de stocks de plutonium compris entre ceux représentés sur la figure 10 et ceux de la figure 14.

7 Conclusions et perspectives

Nous nous sommes basés dans cette étude sur une hausse d'un facteur 8 de la production d'énergie par le nucléaire en 2050, ce qui constitue probablement un scénario minimal. Nous avons ensuite examiné les divers moyens disponibles ou à développer afin de satisfaire cette demande de manière durable.

En continuant dans la voie actuelle de production d'énergie nucléaire, soit avec un parc de réacteurs à eau légère, et en considérant le scénario le plus optimisé basé sur le multirecyclage du plutonium et une utilisation optimale de l' ^{235}U , la demande énergétique mondiale ne peut être satisfaite au-delà de 2085, du fait de l'épuisement rapide des ressources en uranium fissile naturel. Ceci est bien sûr incompatible avec la notion de développement durable dans le contexte actuel où d'autres solutions de production de l'énergie (fusion, ...) n'en sont qu'au niveau de la recherche. De plus, un tel multirecyclage serait une opération très complexe et coûteuse, qui dégraderait le plutonium, seule matière fissile disponible après l'épuisement des ressources naturelles. Cela rendrait très coûteux le redémarrage d'une production significative d'énergie nucléaire.

La seconde voie étudiée a été la production d'énergie basée sur un parc de réacteurs à eau légère et de réacteurs à neutrons rapides. Le scénario optimisé dans ce cas permet de remplir la demande énergétique mondiale sans interruption. Cependant, cela mène à de grandes quantités de plutonium et d'actinides mineurs présents dans les

réacteurs et dans les unités de retraitement du combustible, d'où la nécessité d'une gestion très complexe. De plus, en cas d'arrêt du nucléaire, par exemple remplacé par une autre source d'énergie (fusion, ...), le problème se pose de l'incinération des stocks de plutonium, incinération extrêmement difficile, longue et coûteuse, voire irréalisable. Un redémarrage serait dans ce cas très coûteux aussi.

La troisième voie étudie la production d'énergie par un parc de réacteurs à eau légère et de réacteurs à sels fondus basés sur le cycle du combustible $\text{Th}/^{233}\text{U}$. Ce scénario permet également de satisfaire la demande énergétique mondiale, mais conduit à des stocks non négligeables de plutonium dégradé et sans possibilité d'incinération, ce qui ne ferme pas le cycle des combustibles des réacteurs à eau légère.

Enfin, la dernière voie étudiée consiste en l'utilisation des trois types de réacteurs considérés dans l'étude, les réacteurs à eau légère, les réacteurs à neutrons rapides et les réacteurs à sels fondus. Ce scénario semble de loin le plus efficace. Il permet un déploiement, et également un arrêt si nécessaire, plus rapide et donc plus souple. Les réacteurs à neutrons rapides servent aussi à fermer le cycle U/Pu , et les quantités de plutonium et d'actinides mineurs produits sont significativement plus faibles que dans les scénarios précédents. Cela implique une gestion plus simple, donc plus facilement réalisable, des déchets. Le déploiement obtenu est ainsi durable et efficace, optimisant l'utilisation des matières fissiles et la production de déchets à gérer.

Il est important de rappeler que des données importantes pour l'étude des divers scénarios ont été ici simplement estimées, notamment pour la surgénération du plutonium et la production de ^{233}U dans les EPR et les RNR. Un programme de recherches visant à donner un fondement à ces estimations est en cours au CNRS, dans le Groupe de Physique des Réacteurs du LPSC de Grenoble ainsi qu'à l'IPN d'Orsay. Des tests ont permis de montrer que les conclusions obtenues ici sont cependant peu sensibles aux hypothèses choisies sur les systèmes.

Cette étude doit être complétée, afin d'inclure notamment des aspects plus locaux du déploiement. D'une part, cela fera apparaître des difficultés possibles dues à l'échange et au transport de matières fissiles et/ou radiotoxiques, ainsi que des risques de prolifération. D'autre part, tous les pays ne sont pas "à égalité" devant le nucléaire. Il serait intéressant d'étudier le déploiement futur du nucléaire dans deux types de régions, notamment :

- Dans une région comme l'Europe, déjà munie d'un parc conséquent de réacteurs à eau légère et donc d'un certain stock de plutonium, et de plus dont la croissance de la production d'énergie nucléaire va être relativement modérée dans les 100 ans à venir. Un scénario basé sur des réacteurs à eau légère et des RNR est ici intéressant, si d'autres régions du monde utilisent la filière $\text{Th}/^{233}\text{U}$.
- Dans une région comme l'Asie du Sud-Est, dont le développement de la demande énergétique, et donc de l'énergie nucléaire va être très important dans les années à venir. Ici, un scénario utilisant uniquement des réacteurs à eau

légère est irréaliste, de même qu'un scénario basé sur des réacteurs à eau légère et des RNR qui nécessitent de grandes réserves de plutonium. Un déploiement utilisant également des réacteurs à sels fondus serait ici beaucoup plus souple, rapide, et donc particulièrement adapté.

Les scénarios globaux présentés dans ce document illustrent bien les limitations d'un déploiement mondial de l'énergie nucléaire, tout en mettant en évidence la complémentarité des différents types de filières de réacteurs. Cette étude fait apparaître la contrainte forte de disposer de matière fissile pour démarrer un parc de réacteurs régénérant leur combustible. Par ailleurs, ces réacteurs régénérateurs ne peuvent être déployés industriellement avant 20 à 25 ans. Pour assurer la montée en puissance du nucléaire et la transition vers ce parc à production durable, des réacteurs à eau légère de 2^{ème} et 3^{ème} générations devront être construits. Notre étude a montré qu'une solution globale et équilibrée existe, qui concilie à la fois la fermeture du cycle, un non-épuisement des ressources naturelles, ainsi qu'une réduction de la production des déchets à longue durée de vie, et la possibilité de s'arrêter ou de redémarrer rapidement. Elle combine donc les réacteurs à eau légère avec des réacteurs régénérateurs, indispensables pour brûler le plutonium et produire l'²³³U, pour aboutir à un cycle du combustible Th/²³³U qui nous semble incontournable.

Références

- [1] "L'énergie nucléaire d'ici 2050, une réflexion et des recommandations d'un groupe de scientifiques du CNRS dans le cadre du Programme Energie du CNRS", Groupe d'Analyse Thématique 11-a "Nucléaire du futur - Fission", J.-M. Loiseaux et al, CNRS/PACE/DIR 2004.1
- [2] "Programmes de simulation du déploiement de l'électro-nucléaire dans l'environnement DALI : module Scénarios Du Futur", D. Heuer et E. Merle-Lucotte, note interne (<http://lpsc.in2p3.fr/gpr/french/gpr.html>), 2004.
- [3] "Un point de vue sur les besoins et les approvisionnements en énergie à l'horizon 2050", R.P. Bauquis, La revue de l'Energie N° 509, septembre 1999.
- [4] "Scenarios with an Intensive Contribution of Nuclear Energy to the World Energy Supply", H. Nifenecker, D. Heuer, J.M. Loiseaux, O. Méplan and A. Nuttin, Int. J. Global Energy Issues, Vol. 19, No. 1(2003), 63-77
- [5] "Modèle POLES du LEPII-EPE : résultats préliminaires à l'horizon 2050", P. Criqui, Laboratoire d'Economie de la Production et de l'Intégration Internationale (LEPII), département Energie

et Politiques de l'Environnement (EPE), Grenoble, communication privée (2004).

- [6] "Les Centrales Nucléaires dans le Monde", ELECNUC, CEA, 2003
- [7] "Scénarios CNE : réacteurs classiques, caractérisation à l'équilibre", C. de Saint Jean, M. Delpech, J. Tommasi, G. Youinou, P. Bourdot, rapport CEA DER/SPRC/LEDC/99-448, 2000.
- [8] "Molten Salt Reactors and Possible Scenarios for Future Nuclear Power Deployment", E. Merle-Lucotte, L.Mathieu, D. Heuer, J-M. Loiseaux et al, Proceedings of the Physor 2004 conference *The Physics of Fuel Cycles and Advanced Nuclear Systems : Global Developments*, American Nuclear Society (Ed.) (2004) 1-12
- [9] "Les ressources d'uranium fissile permettent-elles de répondre à une forte croissance de l'énergie nucléaire mondiale?", J.F. Luciani et A. Simon, rapport CEA HC/AS/em/2002-192, octobre 2002.
- [10] "Thorium Molten Salt Reactor : from high breeding to simplified reprocessing", L. Mathieu, D. Heuer, A. Nuttin et F. Perdu, International Conference on Future Nuclear Systems Global 2003, soumis à Int. J. Global Energy Issues.
- [11] "Potentialités du concept de réacteur à sels fondus pour une production durable d'énergie nucléaire basée sur le cycle thorium en spectre épithermique", A. Nuttin, Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2002.